银川平原湿地典型沉水植物群落物种多样性对底泥的响应

赵明涛， 王超群， 梁美琪， 何彤慧
（宁夏大学生态环境学院，宁夏 银川 750021）

摘　要：了解沉水植物群落物种多样性对于底泥氮磷营养水平的响应，可以明确两者之间的作用关系，对于研究区域乃至类似地区湿地植被和环境的时空变化、生境修复、污染治理及规划管理等，都有直接的理论和实践意义。本研究以银川平原湖泊和沟渠水域湿地为研究区，进行野外沉水植物群落调查，获取底泥环境养分。采用群落学分类法筛选出三种典型沉水植物群落，对底泥进行了氮磷营养水平等级评价。采用结构方程模型分析典型沉水植物群落物种多样性及底泥氮磷营养水平等级各组分间的作用关系。得到以下结论：(1) 银川平原湖泊和沟渠水域湿地常见沉水植物有8种。典型沉水植物群落为篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)群落、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)群落和菹草(*Potamogeton crispus*)群落。菹草群落物种组成多样性和物种贡献的复杂程度高，且物种分布均匀，篦齿眼子菜群落物种呈现集群化或斑块化分布。(2) 银川平原湖泊和沟渠水域湿地底泥氮磷营养水平共存在三种等级(丰富、适量、贫乏)，主要以适量和贫乏等级为主。(3) 篦齿眼子菜群落和穗状狐尾藻群落主要生长分布在贫乏和适度的底泥营养水平上，菹草群落主要生长分布在贫乏、适度和丰富的底泥营养水平上。(4) 底泥氮磷营养水平对三种典型沉水植物群落物种多样性具有显著正效应，能够促进群落多样性指数增高。三种典型沉水植物群落多样性主要受到物种均匀度的影响。底泥氮磷营养水平主要受到P元素的影响。

关键词：沉水植物群落；底泥营养水平；结构方程模型；响应

底泥作为水体内源污染物释放的主要方式[1-2]，若其N、P营养水平过高，会过量的向水体输入N、P营养盐[3]，制约湿地生态系统健康。沉水植物是指扎根于水域基底并长期沉于水面以下的一类大型水生植物[4-5]，能够减轻底泥再悬浮，减少湿地水体内源负荷，对浅水湿地生态系统底泥氮磷释放起抑制作用[6]。大量研究表明，沉水植物群落沉在水中，干旱半干旱区的水分约束条件就不存在，影响其生长和繁殖的主要因素有光照、营养盐、盐分、pH等其他环境因子[7-10]，因其扎根于底泥，从底泥中吸收氮磷等营养物质，用于自身生长发育，沉水植物与底泥环境中的N、P含量之间存在互作关系[11-12]，前者会影响湿地底泥N、P化学计量特征[13]，后者对植物体N、P元素的吸收利用率和体内循环的稳定性具有关键作用[14]，且底泥中N、P元素的含量和形态与沉水植物的生长分布密切相关。

银川平原地势平坦，因黄河过境和历史以来的引黄灌溉，形成发达的沟渠体系和众多的退排水小型湖泊，沉水植物群落多样且分布广泛[15]。但大多数研究集中在沉水植物对水体环境因子的响应方面[16-17]。目前有关银川平原水域湿地沉水植物对底泥氮磷营养水平的响应研究较为缺乏，因此，本研究以银川平原湖泊和沟渠水域湿地的三种典型沉水植物群落为研究对象，开展研究拟解决以下科学问题。(1) 典型沉水植物群落对底泥氮磷营养水平的响应是什么？(2) 植物群落物种多样性与底泥氮磷营养水平各组分间的作用关系如何变化？研究结果可为银川平原湖泊和沟渠水域湿地乃至类似地区湿地植被和环境的时空变化、生境修复、污染治理及规划管理等提供科学依据。

收稿日期：2023-03-30；　**修订日期**：2023-05-30
基金项目：国家自然科学基金资助项目(41761102)；宁夏自治区科技重大专项(2021BEG02011)
作者简介：赵明涛(1998-)，男，硕士研究生，主要从事土壤污染修复和湿地生态监测及恢复研究. E-mail: 2849032750@qq.com
通讯作者：何彤慧. E-mail: heth@nxu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏北部的银川平原区(图1),其周边的某些特殊湖泊也列入了采样地,地理位置位于37°50′~39°23′N,104°17′~107°39′E。气候属北温带大陆性干旱半干旱气候,年降水量平均为200 mm左右,冬季寒冷干燥,夏季高温少雨,年平均温度8~10 ℃。黄河经青铜峡流入,由麻黄沟流出,过境流程总长190 km。银川平原地势平坦,因黄河过境和历史以来的引黄灌溉,形成发达的沟渠体系和众多的退排水小型湖泊,沉水植物群落多样且分布广泛。

1.2 研究方法

于2021年6—7月采用随机法进行取样,结合样方法与样线法(图2),样线基本平行于湖泊及沟渠岸线,在样线上根据群落变化布设样方。对银川平原54个湖泊和沟渠水域湿地,对生长旺盛的沉水植物群落进行综合调查。布设样方面积为1 m×1 m,每个样点设置三个重复,共布设样方162个,剔除非沉水植物样方19个,剩余143个,记录植物物种名、盖度、密度、高度等特征指标。

利用土钻法在样方内采集0~20 cm植物根系土样,塑料自封袋包装,编号记录。每组样地设计2~3个重复,将采集到的土壤带回实验室测量理化指标。

底泥理化性质测定,速效磷(AP)和碱解氮(IN)分别采用盐酸–氟化铵法和碱解扩散法测定。

1.2.1 *群落物种多样性指数* 采用植物群落物种多样性指数综合反映群落水平[18–20],具体有Shannon-Weiner指数、Patrick指数、Margalef指数和Pielou指数。计算公式为:

$$\text{Margalef} = S - 1/\ln N \tag{1}$$

$$\text{Shannon-Wiener} = -\sum P_i \ln P_i \tag{2}$$

$$\text{Patrick} = S \tag{3}$$

$$\text{Pielou} = H/\ln S \tag{4}$$

式中:N为所在样方中植物个体数之和,S为样方内的物种数,P_i为第i种植物的相对重要值,计算公式为P_i=(相对高度+相对盖度+相对密度)/3。

频率计算公式为:某群落出现数/群落的总数

1.2.2 *底泥氮磷营养水平评价* 评价底泥氮磷营养等级的方法是按照《全国第二次土壤普查养分分级标准》,同时借鉴前人选择的适宜性评价指标,参考银川平原湖泊和沟渠水域湿地特点,以碱解氮、速

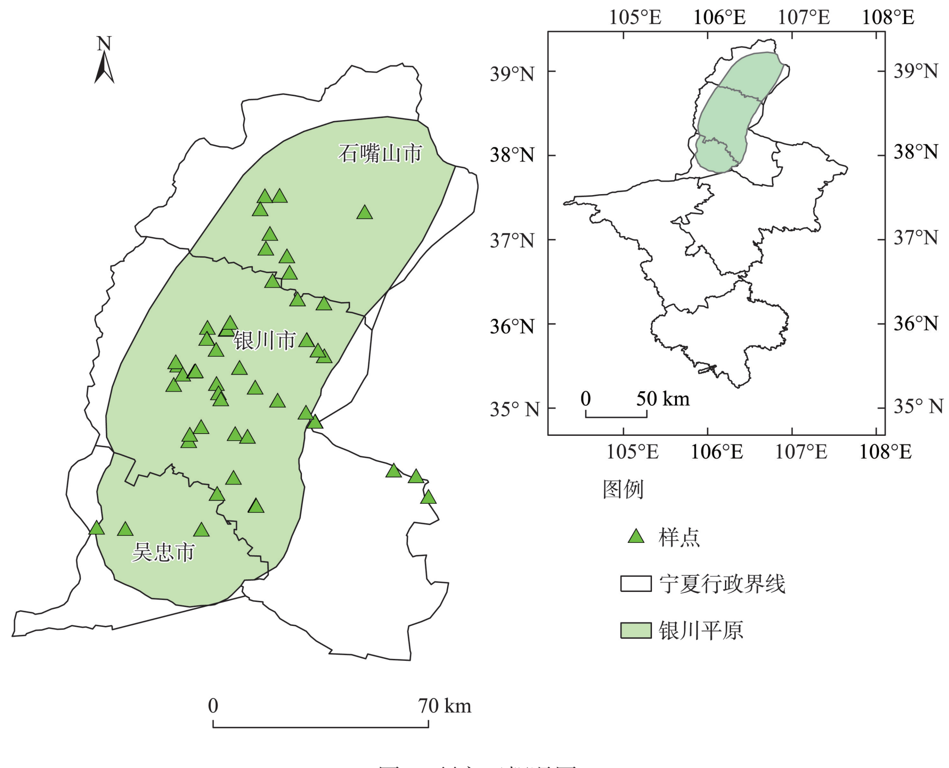


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

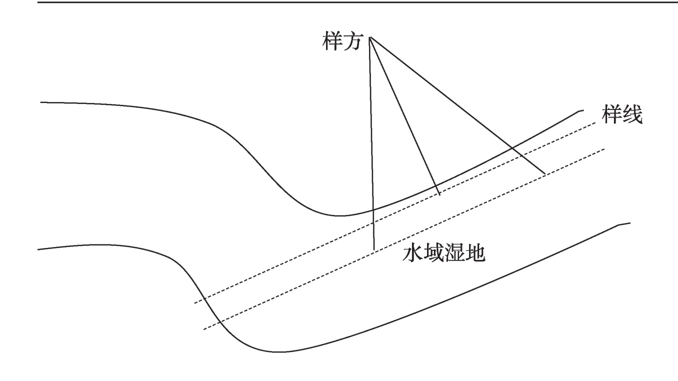


图2　样线和样方布设示意图

Fig. 2　Sample line and quadrat layout diagram

效磷为土壤氮磷质量评价因子,构建该区域的底泥氮磷质量评价体系。

(1)底泥营养指标参数标准化

$$P_i = S_i C_i \tag{5}$$

式中:P_i为底泥单质量指数;C_i为i属性底泥质量的实测值;S_i为i属性的临界标准;i为某种底泥质量属性。

(2)内梅罗指数计算

$$P = \sqrt{\frac{P_i^2 + P_{\min}^2}{2}\frac{n-1}{n}} \tag{6}$$

式中:P为底泥质量指数,P_i为样品中单质量指数的平均值;$P_{\min}$为各种样品单质量指数的最小值;n为参与评价因子的个数。

低泥氮磷分级标准参照全国第二次土壤普查养分分级标准资料(表1)。

1.3　数据处理与分析

使用Excel 2010进行数据整理和分析;SPSS 26.0进行统计描述性统计分析、相关性分析和主成分分析;SPSS Amos进行结构方程模型分析;采用Origin 2018绘图。

表1　底泥氮磷分级标准

Tab. 1　Substrate nitrogen and phosphorus classification criteria

养分指标	贫乏	适量	丰富
碱解氮/($mg·kg^{-1}$)	<30	30~90	>90
有效磷/($mg·kg^{-1}$)	<3	3~10	>10

2　结果与分析

2.1　银川平原湿地常见沉水植物

通过对银川平原54个湖泊和沟渠水域湿地生长旺盛的沉水植物调查,共采集记录了9种沉水植物,剔除频度<5%的浮叶眼子菜(*Potamogeton natans*)偶见种,其余8种分别为篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、大茨藻(*Najas marina*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、小茨藻(*Najas minor*)、穿叶眼子菜(*Potamogeton perfoliatus*)、狸藻(*Utricularia vulgaris*),隶属5科5属,其中眼子菜科4种,茨藻科两种,金鱼藻科、小二仙草科和狸藻科各一种(表2)。

共调查了143个沉水植物群落,采用群落学分类法,利用野外植被调查数据,选择样方内沉水植物多度、盖度和生物量最大的物种为群落建群种,从而对群落进行命名[21],共发现41个篦齿眼子菜群落,32个穗状狐尾藻群落,26个菹草群落,17个小茨藻群落,8个大茨藻群落,10个金鱼藻群落,6个穿叶眼子菜群落,3个狸藻群落,出现频率分别为28.67%、22.38%、18.18%、12.59%、5.59%、6.29%、4.19%、2.09%。典型沉水植物群落为篦齿眼子菜群落、穗状狐尾藻群落和菹草群落。

2.2　三种典型群落的物种多样性

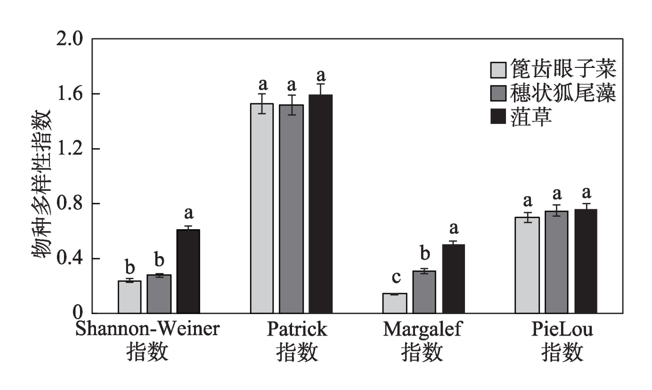
银川平原湿地沉水植物群落物种多样性状况,

表2　银川平原湿地常见沉水植物名录

Tab. 2　List of common submerged plants in wetland of Yinchuan Plain

序号	种名	拉丁学名	属名	科名
1	篦齿眼子菜	*Potamogeton pectinatus*	眼子菜属	眼子菜科
2	大茨藻	*Najas marina*	茨藻属	茨藻科
3	穗状狐尾藻	*Myriophyllum spicatum*	狐尾藻属	小二仙草科
4	金鱼藻	*Ceratophyllum demersum*	金鱼藻属	金鱼藻科
5	菹草	*Potamogeton crispus*	眼子菜属	眼子菜科
6	小茨藻	*Najas minor*	茨藻属	茨藻科
7	穿叶眼子菜	*Potamogeton perfoliatus*	眼子菜属	眼子菜科
8	狸藻	*Utricularia vulgaris*	狸藻属	狸藻科

采用Shannon-Weiner指数、Patrick指数、Margalef指数和Pielou指数表征[22]。如图3所示，三种沉水植物群落Shannon-Weiner指数和Margalef群落丰富度呈现显著性差异（$P<0.05$），Patrick指数和Pielou指数并无显著性差异。其中篦齿眼子菜群落物种多样性指数较小，菹草群落物种多样性指数较大，穗状狐尾藻群落物种多样性指数居于两者之间。



注：不同小写字母表示不同样地差异性显著（$P<0.05$）。下同。

图3 沉水植物群落物种多样性指数

Fig. 3 Submerged plant community species diversity index

2.3 底泥氮磷营养等级

底泥是一个多因素、多层次的复杂系统，在有限的资源内，难以获取底泥的全部信息。因此，本研究通过选用有限的、关键的环境影响指标来评价底泥的营养水平，并且有学者采用碱解氮、速效磷含量来表征底泥氮磷营养变化[23]。综上所述，本文采用IN、AP去构建底泥营养等级体系，通过将研究区速效磷（AP）和碱解氮（IN）的分析数据带入公式（7）、公式（8）中，并参照《全国第二次土壤普查养分分级标准》数据表对比。结果如表3所示，研究区54个样点中，共存在三种底泥氮磷营养等级（丰富、适量、贫乏），其中氮磷营养属于丰富等级的样点有9个，属于适量等级的样点有18个，属于贫乏等级的样点有26个。

2.4 典型沉水植物群落对底泥氮磷营养水平的响应

沉水植物群落均具有发达的根系，能够扎根于底泥中，从而吸收营养盐，用于生长、新陈代谢和自身活动。因此底泥营养盐水平是影响沉水植物群落的生长、发育和繁殖的重要因素之一[24]。通过对银川平原三种典型沉水植物群落对底泥营养的响应研究发现，篦齿眼子菜群落和穗状狐尾藻群落主要生长分布在贫乏和适度的底泥营养水平上，菹草群落主要生长分布在贫乏、适度和丰富的底泥营养水平上（图4）。

以《全国第二次土壤普查养分分级标准》为依据，三种沉水植物群落对构建底泥营养的主要指标IN和AP的响应如图5所示，篦齿眼子菜群落和穗状狐尾藻群落对底泥IN和AP指标的响应在贫乏和适度的营养水平上，菹草群落对IN和AP指标的响应在贫乏、适度和丰富的营养水平上。

2.5 典型沉水植物群落结构方程模型分析

2.5.1 *篦齿眼子菜群落* 群落物种多样性指数可以反映植物群落水平[22]，因此基于相关性分析基础，选取物种多样性指数、影响底泥氮磷营养水平指标，建立模型，修正后得到篦齿眼子菜群落与底泥氮磷营养水平相互关系的结构方程模型。结果如图6所示，篦齿眼子菜群落与物种多样性指数关系显著，与Pielou指数相关系数最高，为0.346。底泥氮磷营养水平与IN和AP关系显著，与AP相关系数最高，为0.358。底泥氮磷营养水平对篦齿眼子菜群落具有显著正效应，路径系数为0.401。

2.5.2 *穗状狐尾藻群落* 穗状狐尾藻群落与底泥氮磷营养水平相互关系的结构方程模型如图7所示，穗状狐尾藻群落与物种多样性指数关系显著，与Pielou指数相关系数最高，为0.354。底泥氮磷营养水平与IN和AP关系显著，与AP相关系数最高，为0.320。底泥氮磷营养水平对穗状狐尾藻群落具有显著正效应，路径系数为0.413。

表3 底泥氮磷营养等级

Tab. 3 Substrate nitrogen and phosphorus fertility rating

样地编号	氮磷营养	个数
17、23、38、39、46、48、51、53、54	丰富	9
2、7、9、10、11、13、16、20、25、27、32、33、34、35、36、37、44、49、50	适量	19
1、3、4、5、6、8、12、14、15、18、19、21、22、24、26、28、29、30、31、40、41、42、43、45、47、52	贫乏	26

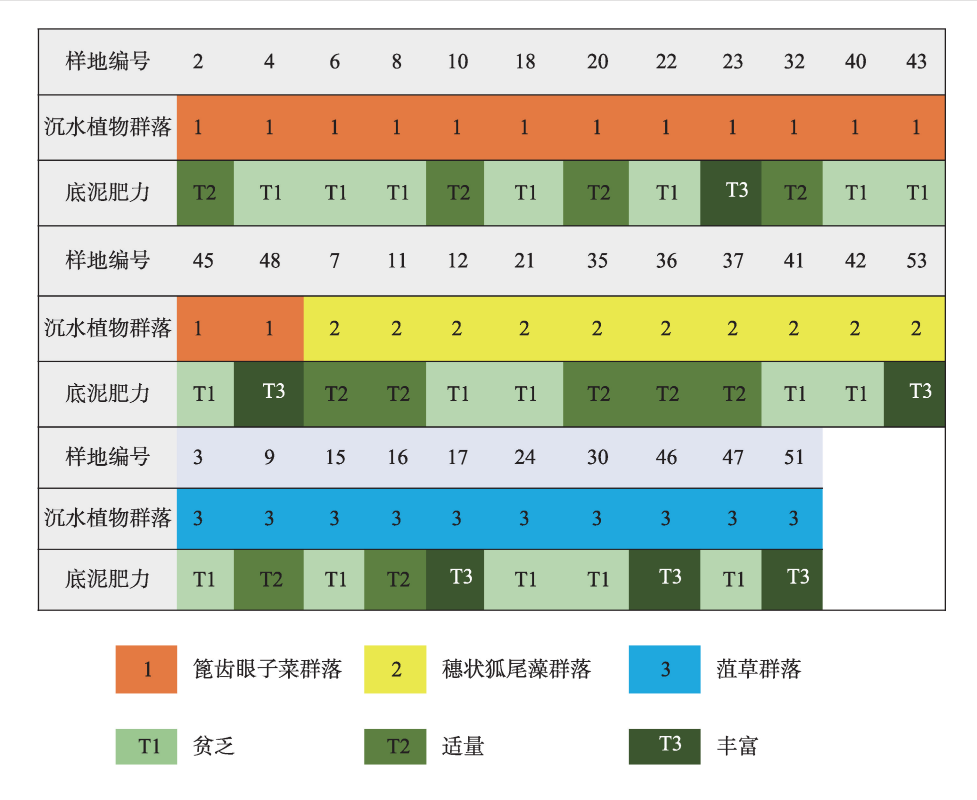


图4　三种沉水植物群落对底泥营养的响应

Fig. 4　Response of three submerged plant communities to substrate fertility

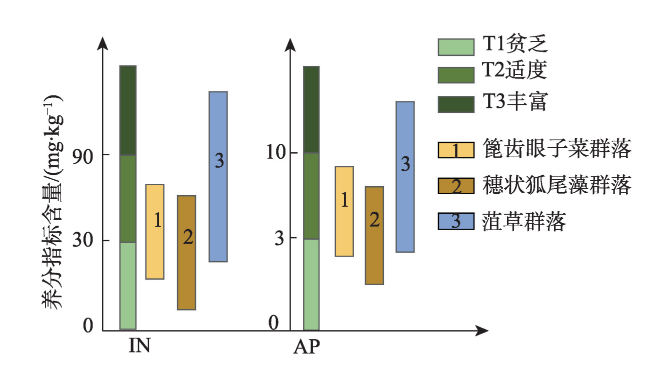
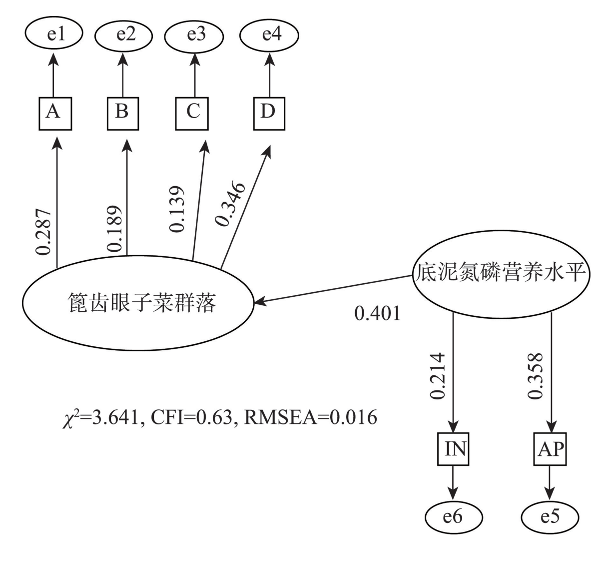


图5　三种沉水植物群落对构建底泥营养主要指标的响应

Fig. 5　Response of three submerged plant communities to the main indicators of sediment fertility

2.5.3 菹草群落　菹草群落与底泥氮磷营养水平相互关系的结构方程模型如图8所示，菹草群落与物种多样性指数关系显著，与Pielou指数相关系数最高，为0.366。底泥氮磷营养水平与IN和AP关系显著，与AP相关系数最高，为0.429。底泥氮磷营养水平对菹草群落具有显著正效应，路径系数为0.451。



注：e为变量，实线代表显著路径，箭头指向表示影响效应方向，数字代表每条路径的标准化系数。A为Shannon-Weiner指数，B为Patrick指数，C为Margalef指数，D为Pielou指数。下同。

图6　篦齿眼子菜群落与底泥营养水平各组分间的结构方程模型

Fig. 6　Structural equation model of *Potamogeton pectinatus* community with sediment fertility level

3　讨　论

3.1　典型沉水植物群落

银川平原湖泊和沟渠水域湿地常见沉水植物为篦齿眼子菜、大茨藻、穗状狐尾藻、金鱼藻、菹草、小茨藻、穿叶眼子菜、狸藻，隶属5科5属，其中眼子菜科4种，茨藻科两种，金鱼藻科、小二仙草科和狸

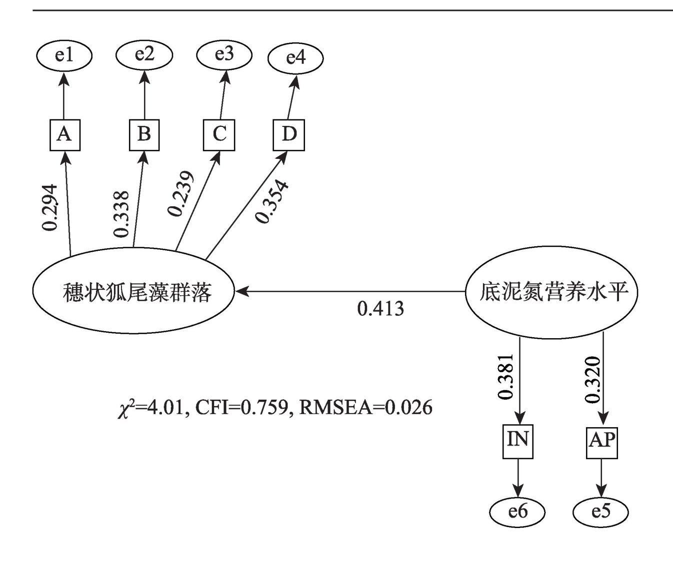


图7 穗状狐尾藻群落与底泥营养水平各组分间的结构方程模型

Fig. 7 Structural equation model of *Myriophyllum spicatum* community with sediment fertility level

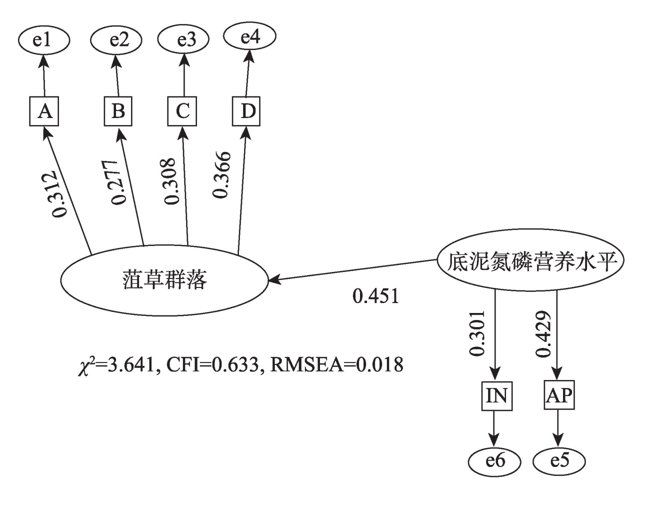


图8 菹草群落与底泥营养水平各组分间的结构方程模型

Fig. 8 Structural equation model of *Potamogeton crispus* community with sediment fertility level

藻科各一种。典型沉水植物群落为篦齿眼子菜群落、穗状狐尾藻群落和菹草群落。

群落多样性指数是集成群落高度、多度、频度和盖度等直接观测指标的复合指标,不同指数对群落性质有不同的指示意义。三种典型沉水植物群落Shannon-Weiner指数和Margalef群落丰富度呈现出存在显著性差异($P<0.05$),Patrick指数和Pielou指数并无显著性差异。其中篦齿眼子菜群落多样性指数较小,菹草群落多样性指数较大,穗状狐尾藻群落多样性指数居于两者之间。这是由于菹草群落主要由菹草、小茨藻、大茨藻、篦齿眼子菜和穗状狐尾藻组成,物种组成多样性和物种贡献的复杂程度高,且物种分布均匀,篦齿眼子菜群落主要由篦齿眼子菜、金鱼藻、大茨藻、小茨藻和狸藻组成,在群落内呈现集群化或斑块化分布,物种组成多样性和复杂程度低于菹草植物群落。

3.2 底泥氮磷营养水平等级

底泥养分的分布和变化主要受到湿地生态系统的植物群落类型和土壤理化性质等多种因素的影响[25]。研究靶区某些样点周边存在着鱼塘和农田,水体流动富集了养分,加上样点湿地水体处于静止状态,底泥发生同化作用[26],N、P发生富集。其次底泥氮磷的来源主要是依赖植物有机残体分解以及腐殖质化程度[27-28],银川平原湖泊和沟渠水域湿地中植物群落类型丰富,植物群落具有较高的生产力,生物量大,且植物衰败腐烂后养分全部返还于底泥之中[15]。并且有学者采用碱解氮、速效磷含量来表征底泥氮磷营养变化[23]。因此对底泥氮磷营养水平等级体系采用IN和AP去构建。构建等级体系后发现共存在三种等级(丰富、适量、贫乏),主要以适量和贫乏等级为主。可能是某些样点长期以来并未受到人为因素的干扰,自身生态系统良好,资源利用率高,养分底泥营养偏低导致[28-29]。

3.3 典型沉水植物群落对底泥氮磷营养水平的响应

通过对银川平原三种典型沉水植物群落对底泥营养的响应研究发现,篦齿眼子菜群落和穗状狐尾藻群落主要生长分布在贫乏和适度的底泥营养水平上,菹草群落主要生长分布在贫乏、适度和丰富的底泥营养水平上。这是由于底泥营养评价等级的主要影响指标是AP和IN。篦齿眼子菜群落、穗状狐尾藻群落和菹草群落对底泥AP和IN的响应区间分别为2.29~9.5 $mg\cdot kg^{-1}$、1.29~10.96 $mg\cdot kg^{-1}$、2.99~16.63 $mg\cdot kg^{-1}$和14.03~53.76 $mg\cdot kg^{-1}$、5.59~62.45 $mg\cdot kg^{-1}$、26.53~92.74 $mg\cdot kg^{-1}$。贫乏、适度和丰富的底泥营养等级AP和IN阈值分别为<0.003 $mg\cdot kg^{-1}$、<0.03 $mg\cdot kg^{-1}$;0.003~0.01 $mg\cdot kg^{-1}$、0.03~0.09 $mg\cdot kg^{-1}$;>0.01 $mg\cdot kg^{-1}$、>0.09 $mg\cdot kg^{-1}$。篦齿眼子菜群落和穗状狐尾藻群落对底泥AP和IN营养指标的响应在贫乏和适度的相关水平上,菹草群落对底泥AP和IN营养指标的响应在贫乏、适度和丰富的相关水平上。

3.4 典型沉水植物群落结构方程模型分析

三种典型沉水植物群落均具有发达的根系,扎

根于底泥之中,且在湿地生态系统中,底泥是沉水植物的附着基质和氮(N)、磷(P)等营养盐最主要的贮存库[30],营养盐能够被微生物氧化降解为有机物的量[31-32],提供植物生长所需要的氮磷等营养物质[33-34],从而被植物吸收,用于生长、新陈代谢和自身活动,营养盐浓度的适度提高,可以促进群落生长。如Bole等[35]研究发现当底泥中P含量高于水体中的P含量时,沉水植物主要通过根系从底泥中吸收P。因此底泥氮磷营养水平对三种典型沉水植物群落具有显著正效应。植物群落物种多样性指数能够表现物种水平上的数量特征,也可体现了群落间及其与环境的复杂关系和生态系统中物种资源的丰富程度[36]。Pielou指数可以反映植物群落中物种个体数目的均匀程度。三种典型沉水植物群落与物种多样性指数关系显著,与Pielou指数相关系数最高。说明银川平原湖泊和沟渠水域湿地三种典型沉水植物群落主要受到物种均匀度的影响。底泥氮磷营养水平与IN和AP关系显著,与AP相关系数最高。说明底泥氮磷营养水平主要受到P元素的影响。

4 结 论

(1) 银川平原湖泊和沟渠水域湿地常见沉水植物为篦齿眼子菜、大茨藻、穗状狐尾藻、金鱼藻、菹草、小茨藻、穿叶眼子菜、狸藻。典型沉水植物群落为篦齿眼子菜群落、穗状狐尾藻群落和菹草群落。菹草群落物种组成多样性和物种贡献的复杂程度高,且物种分布均匀,篦齿眼子菜群落物种呈现集群化或斑块化分布。

(2) 银川平原湖泊和沟渠水域湿地底泥氮磷营养水平共存在三种等级(丰富、适量、贫乏),主要以适量和贫乏等级为主。

(3) 篦齿眼子菜群落和穗状狐尾藻群落主要生长分布在贫乏和适度的底泥营养水平上,菹草群落主要生长分布在贫乏、适度和丰富的底泥营养水平上。

(4) 底泥氮磷营养水平对三种典型沉水植物群落特征具有显著正效应,能够促进群落多样性指数增高。三种典型沉水植物群落主要受到物种均匀度的影响。底泥氮磷营养水平主要受到P元素的影响。

参考文献(References):

[1] Anthony Ryle, Hilary Beard. The integrative effect of reformulation: Cognitive analytic therapy with a patient with borderline personality disorder[J]. British Journal of Medical Psychology, 2011, 66(3): 249-258.

[2] Roni P, Hanson K, Beechie T. Global review of the physical and biological effectiveness of stream habitat rehabilitation techniques [J]. North American Journal of Fisheries Management, 2008, 28 (3): 856-890.

[3] 李鹤男, 孙永利, 李鹏峰, 等. 沉水植物水体底质生态修复研究进展[J]. 中国环保产业, 2021, 281(11): 37-41. [Li Henan, Sun Yongli, Li Pengfeng, et al. Research progress on the ecological remediation of water sediment by submerged plants[J]. China Environmental Protection Industry, 2021, 281(11): 37-41.]

[4] Gumbricht T. Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte systems[J]. Ecological Engineering, 1993, 2(1): 1-30.

[5] 代蕾. 沉水植物对不同水质的净化作用及相关机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018. [Dai Lei. Purification and Related Mechanism of Submerged Macrophytes on Different Water Quality[D]. Chongqiong: Chongqiong University, 2018.]

[6] 王兰涛. 沉水植物根际微生物群落演替特征及对氮磷削减效果的研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022. [Wan Lantao. Succession Characteristics of Rhizosphere Microbial Communities of Submerged Plants and their Effects on Nitrogen and Phosphorus Reduction[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2022.]

[7] 许木启, 黄玉瑶. 受损水域生态系统恢复与重建研究[J]. 生态学报, 1998, 18(5): 101-112. [Xu Muqi, Huang Yuyao. Restoration and reestablishment of the damaged ecosystem of inland waters[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(5): 101-112.]

[8] Kemp W M, Batleson R, Bergstrom P, et al. Habitat requirements for submerged aquatic vegetation in Chesapeake Bay: Water quality, light regime, and physical-chemical factors[J]. Estuaries, 2004, 27(3): 363-377.

[9] 常诏峰. 高原沉水植物对铵盐的生理响应研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2021. [Chang Shaofeng. Physiological Response Study on Plateau Submerged Macrophytes of Ammonium[D]. Lhasa: Tibet University, 2021.]

[10] 陈国玲. 滇池流域沉水植物对水体氨氮浓度指示作用的研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2017. [Cheng Guoling. Study on the Indication of Submerged Macrophytes on Ammonia Nitrogen Concentration in Dianchi lake basin[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2017.]

[11] 尹德超, 王雨山, 祁晓凡, 等. 白洋淀湿地不同植物群落区表层沉积物碳氮磷化学计量特征[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 506-516. [Yin Dechao, Wang Yushan, Qi Xiaofan, et, al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in surface sediments of different plant communitites in lake Baiyangdian wetland[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(2): 506-516.]

[12] 包先明, 陈开宁, 范成新, 等. 种植沉水植物和疏浚底泥对氮磷营养水平的影响[J]. 土壤通报, 2006, 44(5): 932–935. [Bao Xianming, Cheng Kaining, Fan Chengxing, et, al. Effects of growth of submerged macrophytes on nitrogen level of dredged sediment of a eutrophic lake[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 44(5): 932–935.]

[13] Cong Hu, Feng Li, Yonghong Xie, et al. Spatial distribution and stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus along an elevation gradient in a wetland in China[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(6): 1128–1140.

[14] 寻亚非, 李映雪, 王佳俊, 等. 拉鲁湿地植物和底泥氮磷生态化学计量学特征[J]. 环境化学, 2021, 40(7): 2105–2114. [Xun Yafei, Li Yingxue, Wang Jiajun, et, al. Ecological stoichiometry characteristics of nitrogen and phosphorus in plants and sediments in Lhalu wetland[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(7): 2105–2114.]

[15] 何玉实. 银川平原水域湿地微生物群落结构特征及其对环境的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2022. [He Yushi. Structure Characteristics of Microbial Community in Water Wetland of Yinchuan Plain and its Response to the Environment[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.]

[16] Demars B O L, Harper D M. The aquatic macrophytes of an English lowland river system: Assessing response to nutrient enrichment[J]. Hydrobiologia, 1998, 384(1–3): 75–88.

[17] Nurminen L. Macrophyte species composition reflecting water quality changes in adjacent water bodies of lake Hiidenvesi, SW Finland[J]. Annales Botanici Fennici, 2003, 40(3): 199–208.

[18] 王婷, 张永超, 赵之重. 青藏高原退化高寒湿地植被群落结构和土壤养分变化特征[J]. 草业学报, 2020, 29(4): 9–18. [Wang Ting, Zhang Yongchao, Zhao Zhizhong. Characteristics of the vegetation community and soil nutrient status in a degraded alpine wetland of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(4): 9–18.]

[19] Zhang Zhenchao, Liu Yu, Su Jian, et, al. Suitable duration of grazing exclusion for restoration of a degraded alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Catena, 2021, 207: 105582.

[20] 许岳飞, 益西措姆, 付娟娟, 等. 青藏高原高山嵩草草甸植物多样性和土壤养分对放牧的响应机制[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1026–1032. [Xu Yuefei, Yixi Cuomu, Fu Juanjuan, et al. Response of plant diversity and soil nutrients to grazing intensity in kobresia pygmaea meadow of Qinghai- Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1026–1032.]

[21] 中国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980. [China Vegetation Editorial Committee. Vegetation of China[M]. Beijing: Science Press, 1980.]

[22] Fauvel M, Lopes M, Dubo T, et al. Prediction of plant diversity in grasslands using Sentinel–1 and–2 satellite image time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 237: 111536.

[23] 蒋芷榆, 孙艺伦, 张婧然, 等. 利用休耕田处理水产养殖废水同步增强土壤营养的试验[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 118–126. [Jiang Zhiyu, Sun Yilun, Zhang Jingran, et al. Experiment of fallow-cropland applied in aquaculture wastewater treatment and synchronous soil fertility improvement[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 118–126.]

[24] 何文凯. 富营养化水体中沉水植被恢复重建影响因子研究——底泥特性对沉水植物生长的影响[D]. 武汉: 武汉大学, 2017. [He Wenkai. Research on Influence Factors of Submerged Macrophytes Restoration in Eutrophic Water- the Effects of Sediment Properties to the Growth of Submerged Macrophytes[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.]

[25] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content[J]. Nature, 2000, 408: 789–790.

[26] 郗敏, 孔范龙, 吕宪国, 等. 三江平原沟渠系统水体和底泥的养分特征及效应[J]. 地理科学, 2014, 34(3): 358–364. [Xi Min, Kong Fanlong, Lv Xianguo, et, al. Nutrient variation in water and sediments of ditch wetlands and their effects on environment in Sanjiang plain, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(3): 358–364.]

[27] 李小乐, 魏亚娟, 党晓宏, 等. 红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 933–942. [Li Xiaole, Wei Yajuan, Dang Xiaohong, et al. Soil mechanical composition and soil nutrient contentof *Reaumuria soongorica* nebkhas[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 933–942.]

[28] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937–3947. [Wang Shaoqiang, Yu Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem Rcarbon, nitrogen andphosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937–3947.]

[29] 李玉武. 西双版纳热带森林生态系统土壤养分动态研究[D]. 西双版纳: 中国科学院西双版纳热带植物园, 2013. [Li Yuwu. Seasonal Dynamics of Soil Nutrients under the Tropical Forest Ecosystem in Xishuangbanna, Southwest China[J]. Xishuangbanna: Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Science, 2013.]

[30] 黄小龙, 郭艳敏, 张毅敏, 等. 沉水植物对湖泊沉积物氮磷内源负荷的控制及应用[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(12): 1524–1530. [Huang Xiaolong, Guo Yanmin, Zhang Yimin, et, al. Controlling of internal phosphorus and nitrogen loading in lake sediment by submerged macrophytes and its application[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(12): 1524–1530.]

[31] 李志亮, 仲跻文. 生化需氧量、化学需氧量、高锰酸盐指数三者关系简析[J]. 水利技术监督, 2015, 23(1): 5–6. [Li Zhiliang, Zhong Jiwen. Analysis of the relationship among biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand and permanganate index [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2015, 23(1): 5–6.]

[32] 邢鳞木, 李强, 高原千惠, 等. 不同供磷水平对紫花苜蓿根际微生物功能多样性的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1496–1503. [Xing Linmu, LI Qiang, Gao Yuanqianhui, et al. Effect of different phosphorus supply levels on rhizosphere microbial functionaldiversity of Medicago sativa[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1496–1503.]

[33] 韩冰, 陈融旭, 梁帅, 等. 3种沉水植物净化引黄灌区退水的应

用潜力[J]. 中国农村水利水电, 2022, (2): 6-11, 19. [Han Bing, Cheng Rongxun, Liang Shuai, et, al. Application potential of three submerged macrophytes in the purification of returned water in yellow river irrigation area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022, (2): 6-11, 19.]

[34] 侍世玲, 任晓萌, 张晓伟, 等. 库布齐沙漠沙枣防护林土壤养分及化学计量特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 469-476. [Shi Shiling, Ren Xiaomeng, Zhang Xiaowei, et al. Soil nutrients and stoichiometric characteristics of the Elaeagnus angustifoliashelterbelt in the Hobq Desert [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 469-476.]

[35] Bole J B, Allan J R. Uptake of phosphorus from sediment by aquatic plants, *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla verticillata*[J]. Water Research, 1978, 12(5): 353-358.

[36] 董世魁, 汤琳, 张相锋, 等. 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1472-1483. [Dong Shikui, Tang Lin, Zhang Xiangfeng, et al. Relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1472-1483.]

Response of species diversity of typical submerged plant communities to sediment in Yinchuan Plain wetlands

ZHAO Mingtao, WANG Chaoqun, LIANG Meiqi, HE Tonghui

(College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Understanding the species diversity of submerged plant communities in response to nitrogen and phosphorus nutrition levels in sediments can clarify the relationship between the two. This relationship has direct theoretical and practical significance for studying the spatial and temporal changes of wetland vegetation and environment, and has implications for habitat restoration, pollution control, and planning management in the study area and similar areas. In this study, the wetland areas (lakes and ditches) of Yinchuan Plain were used as the research area to conduct a field survey of the submerged plant communities to obtain an understanding of the environmental sediment nutrients. Three typical submerged plant communities were screened out by the community classification method, and the nitrogen and phosphorus nutrient levels of the wetland sediment were evaluated. A structural equation model was used to analyze the relationship between the species diversity of typical submerged plant communities and the nitrogen and phosphorus nutrient components of the sediments. The results revealed that eight common submerged plants exist in the wetlands of Yinchuan Plain. The typical submerged plant communities were identified as a *Potamogeton pectinatus* community, a *Myriophyllum spicatum* community, and a *Potamogeton crispus* community. The species composition diversity and species contribution of the *Potamogeton crispus* community were high, and the species distribution was uniform. The species in the *Potamogeton pectinatus* community showed cluster or patchy distribution. Three levels (rich, moderate, and poor) of nitrogen and phosphorus fertility were identified in the sediment of the wetlands of Yinchuan Plain, and moderate and poor levels of fertility were most commonly found. The *Potamogeton pectinatus* and *Myriophyllum spicatum* communities were found to grow mainly in the poor- and moderate-level fertility sediment areas, while the *Potamogeton crispus* community was found to grow in all three levels of sediment nutrient content. The nitrogen and phosphorus nutrition level of the sediment had a significant positive effect on the three typical submerged plant communities, promoting an increase in the community diversity index. The characteristics of the three typical submerged plant communities were mainly affected by species evenness. The nitrogen and phosphorus fertility level of the sediment was mainly affected by the phosphorus level in the sediment.

Keywords: submerged plant community; sediment nutrient level; structural equation model; response